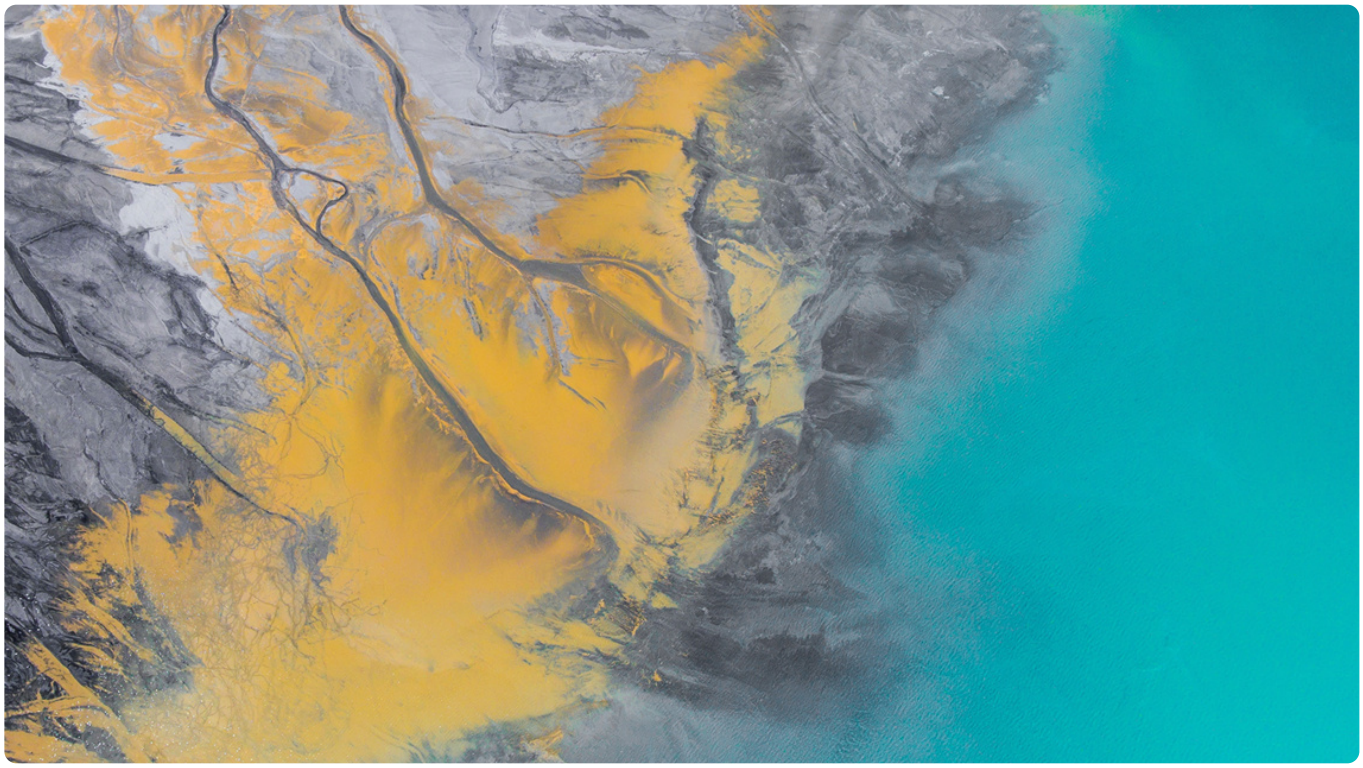
13 | LLVM：如何将自定义的语言编译到 WebAssembly?

2020-10-02 于航

WebAssembly入门课 进入课程 >



讲述：于航
时长 10:55 大小 10.01M

你好，我是于航。

应用 Wasm 的常见方式有几种类型，一种方式是通过 Web 浏览器提供的 JavaScript API 与 Web API，来在 Web 应用中调用从 Wasm 模块中导出的函数。通过这种方式，我们可以充分利用 Wasm 的安全、高效及可移植性等优势。

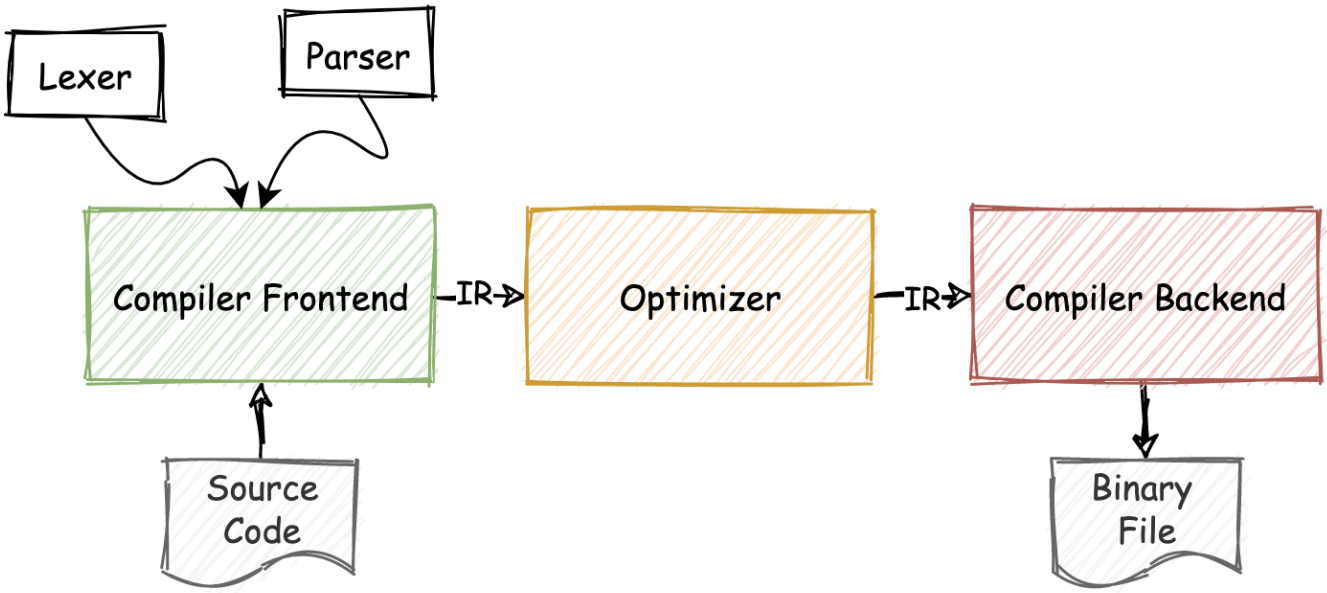
另一种方式是通过 WASI 抽象系统调用接口，以便在 out-of-web 应用中使用 Wasm。这种使用方式与 Web 端大同小异，不过区别是可以借助底层运行时的能力，使得我们构建出的 Wasm 应用可以在 Web 浏览器外的 Native 环境中与操作系统打交道，并同样享受 Wasm 本身所带来的安全、高效及可移植性。

而今天我们要介绍的另外一个 Wasm 的应用场景，则相对有些特殊。在大多数时候，我们都是将由诸如 C/C++ 以及 Rust 等语言编写的源代码，编译至 Wasm 字节码格式来使用。假设此时我们想要设计开发一款自定义的静态编程语言，那么怎样才能够方便快捷地为它的编译器添加一个能力，可以让编译器支持将 Wasm 作为编译目标呢？

关于这个问题，我们要先从传统的编译器链路开始说起。

传统编译器链路

对于传统的静态语言编译器来说，通常会采用较为流行的“三段式”链路结构。如下图所示，三段式结构分别对应着整个编译器链路中三个最为重要的组成部分：编译器前端（Compiler Frontend）、中间代码优化器（Optimizer），以及编译器后端（Compiler Backend）。



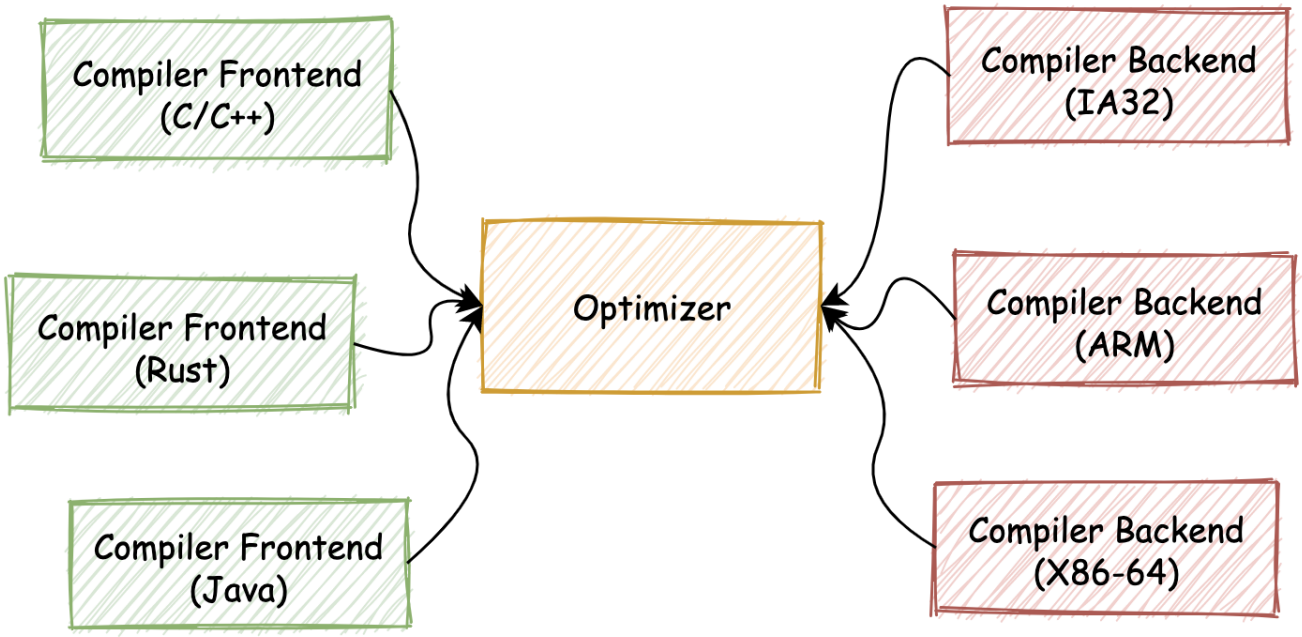
其中，“编译器前端”主要用于对输入的源代码进行诸如：词法、语法及语义分析，并生成其对应的 AST 抽象语法树，然后再根据 AST 来生成编译器内部的中间代码表示形式（IR）。

“中间代码优化器”则主要用于对这些 IR 代码进行一定的优化，以减小最后生成的二进制文件大小，并同时提高二进制代码的执行效率。

最后的“编译器后端”则负责进行与本地架构平台相关的代码生成工作，主要会根据优化后的 IR 代码来进行寄存器分配和调优之类的工作，并生成对应的机器码，存储在构建出的

二进制可执行文件中。当然，流程的细节根据具体编程语言实现可能有所不同。

这种分段式编译器链路的优势在于，当我们想要为其添加多种源语言或目标编译平台的支持时，我们只需要重新编写其中的一个“分段”，便可以很轻松地复用整个编译链路中的其他部分。你可以形象地通过下图来感受这种关系。



比如当我们需要为编译器添加对另外一种源语言的支持时，我们只需要编写整个链路中的“编译器前端”部分即可。

但是满足这种“链路可分离”要求的一个前提，需要整个链路中用于对接各个阶段的“中间产物（IR）”，其存在形式必须是确定且不变的。编译器前端“输送”给中间优化器的 IR 代码格式，必须对所有为各种源语言设计的编译器前端保持一致。同理，从中间优化器输入到编译器后端的“中间产物”也是如此。

然而一个现实的情况是，实际上在 LLVM 出现之前，在各类编程语言的编译器链路中，并没有采用完全统一的中间产物表示形式（包括 IR、AST 等在内）。因此如果想要对编译器链路中的某一部分进行重用，这个过程仍然会十分困难。

这就造成了每当人们需要重新设计一款编程语言时，需要将整个编译器的编译链路重新编写。但实际上编译器针对不同编程语言变化的部分，可能就只有编译器前端而已。

编译器链路的分段模式还有另外的一个好处，它可以让编译器开发者的分工更加明确。比如擅长编译器前端的开发者，便可以更加专注地来实现编译器的前端逻辑，为编译器提供针对新源语言的前端，而不用去考虑优化以及编译器后端的逻辑（对于这部分功能可以直接复用已有的编译器链路）。这对于需要投入到商业化运作中的编译器来说，十分有利。

LLVM

LLVM 的全称为 “Low Level Virtual Machine”，翻译成中文即“低层次虚拟机”。最初的 LLVM 是 Chris Lattner 和 Vikram Adve 两人于 2000 年 12 月研发的一套综合性的软件工具链。在这套工具链中，包含了众多可用于开发者使用的相关组件，这些组件包括语言编译器、链接器、调试器等操作系统底层基础构建工具。

LLVM 在开发初期，被定位为一套具有良好接口定义的可重用组件库。这意味着，我们可以在所开发的第三方应用程序中，使用由 LLVM 提供的众多成熟高效的编译链路解决方案。大到“中间代码优化器”，小到代码生成器中的一个 “SelectionDAG 图生成组件”。这些方案以“组件化”的形式被管理在整套 LLVM 工具集中，可用于支持整个编译链路中各个阶段遇到的各种问题。

除此之外，LLVM 还提供了众多可以直接使用的命令行工具。通过这些工具（如 llvm-as、llc、llvm-dis 等等），我们也可以快速地对经由 LLVM 组件生成的中间表示产物，进行一定的变换和处理，这极大地方便了我们的应用开发和调试流程。

LLVM-IR

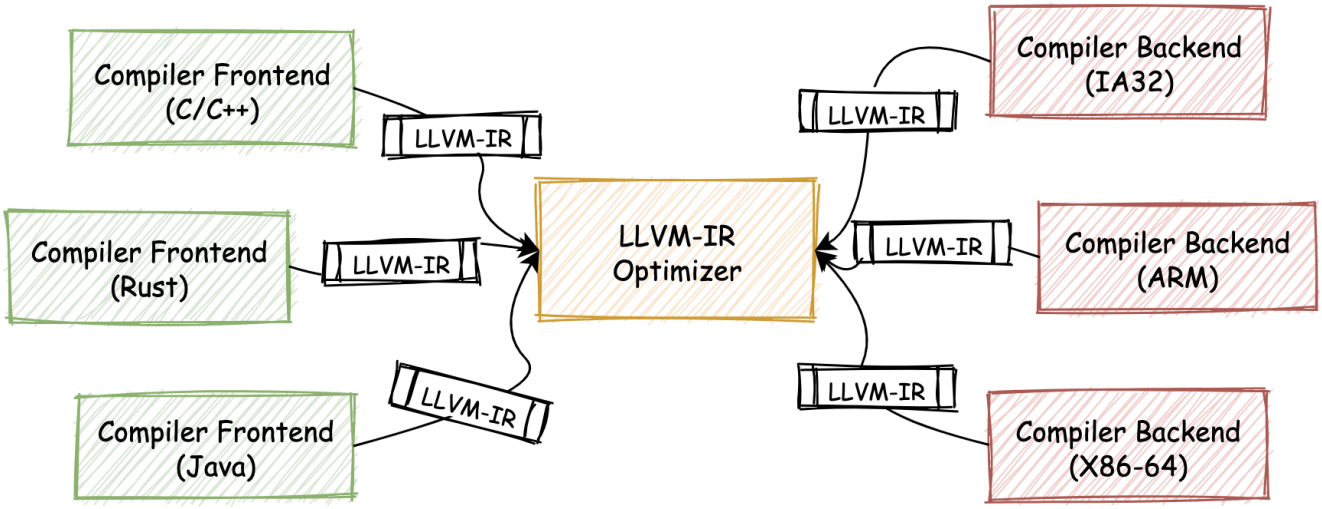
在整个 LLVM 工具链体系中，最重要的组成部分，便是其统一的，用于表示编译器中间状态的代码格式 —— LLVM-IR。在一个基于 LLVM 实现的编译器链路中，位于链路中间的优化器将会使用 LLVM-IR 来作为统一的输入与输出中间代码格式。

在整个 LLVM 项目中，扮演着重要角色的 LLVM-IR 被定义成为一类具有明确语义的轻量级、低层次的类汇编语言，其具有足够强的表现力和较好的可扩展性。通过更加贴近底层硬件的语义表达方式，它可以将高级语言的语法清晰地映射到其自身。不仅如此，通过语义中提供的明确变量类型信息，优化器还可以对 LLVM-IR 代码进行更进一步的深度优化。

因此，通过将 LLVM-IR 作为连接编译器链路各个组成部分的重要中间代码格式，开发者便可以以此为纽带，来利用整个 LLVM 工具集中的任何组件。唯一的要求是所接入的源语言

需要被转换为 LLVM-IR 的格式（编译器前端）。同样，对任何新目标平台的支持，也都需要从 LLVM-IR 格式开始，再转换成具体的某种机器码（编译器后端）。

在 LLVM-IR 的基础上，我们上面所讲的分段式编译链路可以被描绘成下图的形式。



命令行：基于 LLVM 生成 Wasm 字节码

既然基于 LLVM-IR，我们可以方便快捷地为整个编译链路添加新的前端源语言，或者是后端目标平台。因此 Wasm 也同样可以作为一种目标平台，被实现在 LLVM 中（Wasm 作为一种 V-ISA，其实本身与 I386、X86-64 等架构平台没有太大的区别）。

无独有偶的是，在 LLVM 中，已经存在了可用于 Wasm 目标平台的编译器后端。接下来，我们将尝试把一段 C/C++ 代码通过 LLVM 转换为 Wasm 字节码。

这里为了能够完成整个编译流程，我们将使用到 LLVM 工具集中的一个 CLI 命令行工具 —— llc，以及用于将 C/C++ 源代码编译为 LLVM-IR 中间代码的编译器 Clang。Clang 是一个业界知名的，基于 LLVM 构建的编译器，可用于编译 C/C++ 以及 Objective-C 等语言代码。

首先，我们给出如下这段 C/C++ 代码。

复制代码

```
// add.cc
extern "C" {
  int add (int a, int b) {
    return a + b;
  }
```

```
6 }
```

接下来，我们通过下面这个命令，将上面的代码编译为 LLVM-IR 中间代码对应的文本格式。

复制代码

```
1 clang -S -emit-llvm add.cc
```

其中我们通过指定 “-S” 与 “-emit-llvm” 两个参数，使 Clang 在编译源代码时生成对应的 LLVM-IR 文本格式。命令执行完毕后，我们可以得到一个名为 “add.ll” 的文件。通过文本编辑器打开这个文件，你可以看到如下截图所示的 LLVM-IR 内容。

```
; ModuleID = 'add.cc'
source_filename = "add.cc"
target datalayout = "e-m:o-i64:64-f80:128-n8:16:32:64-S128"
target triple = "x86_64-apple-macosx10.15.0"

; Function Attrs: noinline nounwind optnone ssp uwtable
define i32 @add(i32, i32) #0 {
  %3 = alloca i32, align 4
  %4 = alloca i32, align 4
  store i32 %0, i32* %3, align 4
  store i32 %1, i32* %4, align 4
  %5 = load i32, i32* %3, align 4
  %6 = load i32, i32* %4, align 4
  %7 = add nsw i32 %5, %6
  ret i32 %7
}
```

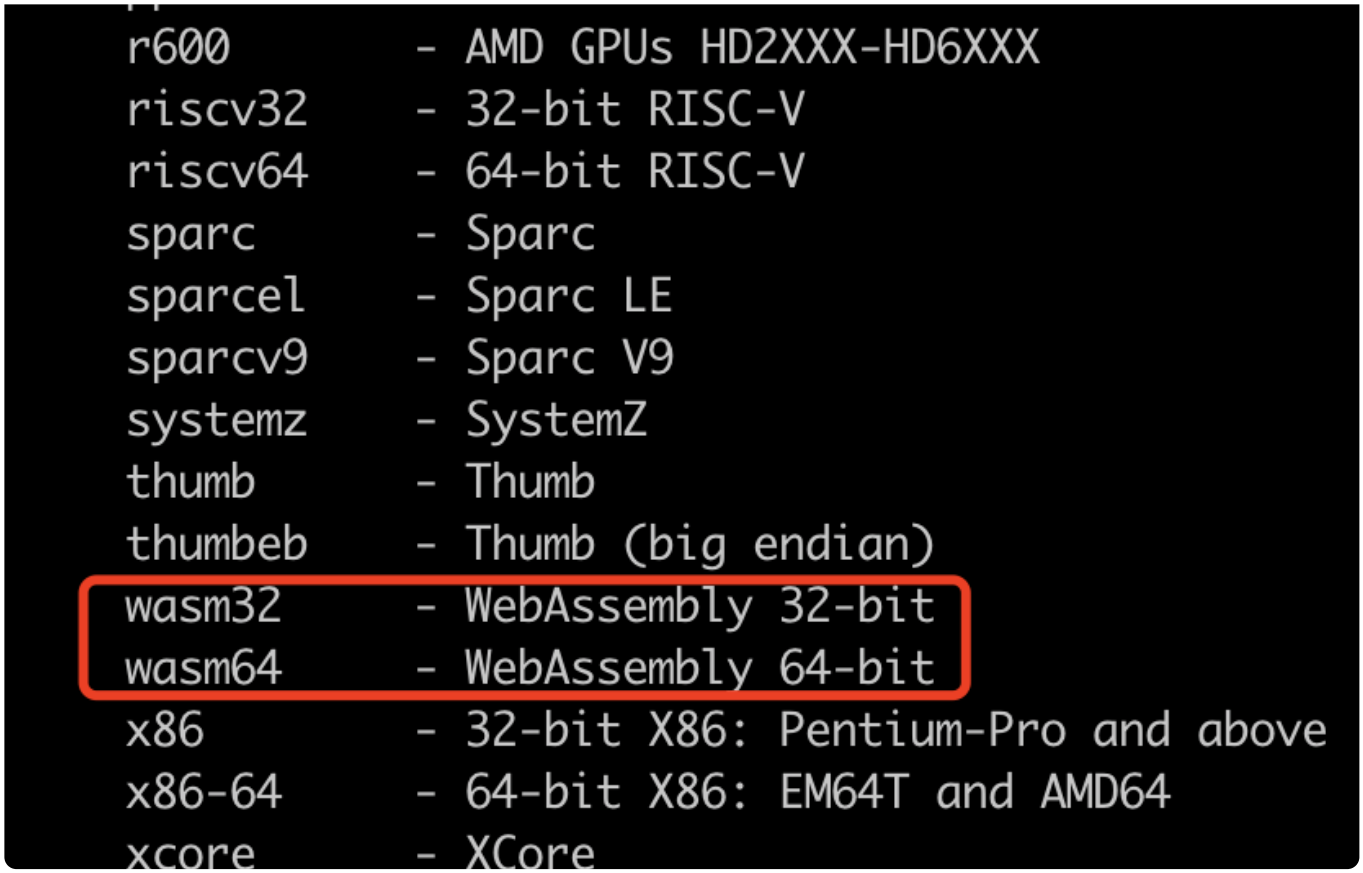
关于 LLVM-IR 的具体内容，你对它有一个大致的概念即可。接下来，我们继续使用 “llc” 工具，来将上面这部分 LLVM-IR 中间代码转换为对应的 Wasm 字节码。

“llc” 是 LLVM 的静态编译器，它可以将输入的 LLVM-IR 代码编译到平台相关的机器码。我们可以通过命令 “llc --version” 来查看它所支持的编译目标平台。如下图所示，

我们可以看到其支持名为 “wasm32” 与 “wasm64” 两种 Wasm 的目标平台，这里我们使用第一个 “wasm32”。

```
➜  Desktop llc --version
LLVM (http://llvm.org/):
  LLVM version 10.0.1
  DEBUG build with assertions.
  Default target: x86_64-apple-darwin19.6.0
  Host CPU: skylake

  Registered Targets:
    aarch64    - AArch64 (little endian)
    aarch64_32 - AArch64 (little endian ILP32)
    aarch64_be - AArch64 (big endian)
    amdgcn     - AMD GCN GPUs
    arm        - ARM
    arm64      - ARM64 (little endian)
    arm64_32   - ARM64 (little endian ILP32)
    armeb      - ARM (big endian)
    bpf        - BPF (host endian)
    bpfeb      - BPF (big endian)
    bpfel      - BPF (little endian)
    hexagon    - Hexagon
    lanai      - Lanai
    mips       - MIPS (32-bit big endian)
    mips64     - MIPS (64-bit big endian)
    mips64el   - MIPS (64-bit little endian)
    mipsel     - MIPS (32-bit little endian)
    msp430     - MSP430 [experimental]
    nvptx      - NVIDIA PTX 32-bit
    nvptx64    - NVIDIA PTX 64-bit
    ppc32      - PowerPC 32
    ppc64      - PowerPC 64
    ppc64le    - PowerPC 64 LE
```



通过如下命令行，我们便可以将上述生成的 LLVM-IR 代码编译为最终的 Wasm 字节码。

复制代码

```
llc add.ll -filetype=obj -mtriple=wasm32 -o add.wasm
```

组件库：Wasm 编译器后端

在上面这个小实践环节中，我们通过使用 LLVM 工具链提供的命令行工具，将基于 C/C++ 代码编写的函数 “add” 编译成了对应的 Wasm 字节码格式。

那相对的，既然 LLVM 中存在着命令行工具可以进行类似的转换，那么在代码层面，便也存在着相应的组件库，能够实现从 LLVM-IR 到 Wasm 字节码的转换过程。

在实际的编码过程中，你可以通过 “llvm::TargetRegistry::lookupTarget” 这个 API 来设置和使用 Wasm 对应的目标编译器后端，以编译中间的 LLVM-IR 格式代码。关于这部分内容，你可以参考 LLVM 的官方文档来查阅更多的细节信息。

总结

好了，讲到这，今天的内容也就基本结束了。最后我来给你总结一下。

在本节课中，我们主要介绍了传统“三段式”编译器链路的一些特点，即分段式的结构更易于编译链路中对各重要组件的复用。同时，“三段式”也能够让编译链路的扩展变得更加轻松。 LLVM 的出现，使分段式编译链路的优点被发挥利用到最大。

LLVM 是一套综合性的软件工具链。内部提供了一系列基于 LLVM-IR、可用于构建编译相关系统工具的各类组件，比如代码优化器、生成器等等。不仅如此，LLVM 还为我们提供了诸如 “llc” 等命令行工具，可用于方便地对 LLVM-IR 等格式进行转换和编译。

最后，LLVM 也同样整合了可用于编译 LLVM-IR 到 Wasm 字节码的编译器后端，因此这对于我们来说，只要能够将我们自定义的编程语言代码编译到 LLVM-IR，那么我们就可以直接利用 LLVM 已有的 Wasm 后端，来将这些 IR 编译到 Wasm 字节码格式。不仅如此，我们还能够直接复用 LLVM 已有的优化器组件，来优化我们的生成代码，进而简化整个编译器的开发工作。

课后思考

最后，我们来做一个思考题吧。

你知道在上面 “llc” 的帮助信息中，所支持平台 “wasm32” 与 “wasm64” 两者有什么区别吗?

今天的课程就结束了，希望可以帮助到你，也希望你在下方的留言区和我参与讨论，同时欢迎你把这节课分享给你的朋友或者同事，一起交流一下。

提建议

© 版权归极客邦科技所有，未经许可不得传播售卖。 页面已增加防盗追踪，如有侵权极客邦将依法追究其法律责任。

上一篇 12 | 有哪些优秀的 WebAssembly 编译器与运行时?

下一篇 14 | 有哪些正在行进中的 WebAssembly Post-MVP 提案?

精选留言 (4)

写留言

鹦鹉
2020-10-02

类似操作系统的 32 位与 64 位之分. 简而言之, wasm32 与 wasm64 的区别主要在于内存寻址范围的不同, 对于 wasm32 仅能对 2 的 32 次方(大约 4GB) 的线性内存范围进行寻址, 而 wasm64 能够在更大范围的内存中寻址. 虽然现在我们的操作系统基本都是 64 位, 但对于 wasm 来说, 区分 wasm32 和 wasm64 两个编译目标的主要的原因在于: 绝大多数 wasm 应用都不需要使用到超过 4GB 的内存....

展开

2

一步
2020-10-07

llc add.ll -filetype=obj -mtriple=wasm64 -o add1.wasm

在 Mac 平台 执行这行命令，生成 wasm64 的目标代码，提示 不支持的
LLVM ERROR: 64-bit WebAssembly (wasm64) is not currently supported

版本信息：...
展开

一步
2020-10-07

存在 wasm32 和 wasm64的平台， 应该可以操作系统 中存在64和32 位的原因是一样的
1: 64 有更大的 CPU 位宽，可以进行更大的数值的计算
2: 内存寻址空间大小不一样

军秋
2020-10-06

使用llc编译后可以在浏览器中运行了吗？好emscripten编译上有什么差异？

> 作者回复: 可以使用，不过只能够使用没有系统调用的 Wasm 模块版本，对 wasi-libc 的支持目前还不是很完善。相比 Emscripten 来说，直接使用 LLVM 的版本会有比较多的冗余字节码，且编译流程较为复杂，比如需要使用单独的 wasm-ld 进行链接以导出 C/C++ 代码中的函数。而 Emscripten 则会帮助你简化整个编译流程到 emcc 中，同时也会自动生成可用的 JavaScript Glue 来帮助你简化 Wasm 模块的使用方式。相较之下，LLVM 就不会帮你去模拟 Web 上的 POSIX 环境了。因此诸如 fopen 这些函数在通过 LLVM 编译到 Wasm 后就无法直接在 Web 浏览器上使用了。

1